

нение происходит за счет сочетания легированности матрицы и количества упрочняющей фазы.

4. Установлено, что лазерная обработка увеличивает количество упрочняющей фазы и повышает микротвердость с 9.39 – 11.21 ГПа в покрытиях без легирования до 11.06 – 11.9 ГПа, легированных MoB, до 11.10 – 12.08 ГПа в покрытиях, легированных TaB и 11.36 – 12.86 ГПа в покрытиях, после легирования V₄C.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ларионов В. П., Болотина Н. П., Аргунова Т. В., Тюнин В. Д., Лебедев Н. П. Влияние лазерной обработки на структуру и состав плазменно-напыленных покрытий системы Ni–Cr–B–Si–C // ФХОМ. 1987. № 1. С. 74 – 78. 2. Спиридонова И. М. Структура и свойства железобороуглеродистых сплавов / *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1984. № 2. С. 58 – 61. 3. Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металлведении. Планирование промышленных экспериментов. - М., 1971. - 36 с. 4. Каледин Б.А. Планирование экспериментов в порошковой металлургии. Методическое пособие по курсу «Математическое планирование экспериментов» для студентов специальности «Порошковая металлургия, и слушателей факультета «Новые материалы» специальности 0414 – «Методы создания композиционных материалов и изделий» Часть I Планы первого порядка. Минск: БПИ, 1982 – 61 с. 5. Каледин Б.А. Планирование экспериментов в порошковой металлургии. Методическое пособие по курсу «Математическое планирование экспериментов» для студентов специальности «Порошковая металлургия, и слушателей факультета «Новые материалы» специальности 0414 – «Методы создания композиционных материалов и изделий» Часть II Планы второго порядка. Минск: БПИ, 1982 – 61 с. 6. Самсонов Г. В. Тугоплавкие соединения. – М.: Металлургия. – 1963. – 398 с. 7. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Финансы и статистика, 1981, – 264 с.

УДК 621.733.74

Савчик В.А., Дьяченко О.В., Василенко А.Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОРОШКОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Прочность сцепления покрытия с основой определялась штифтовым методом, как наиболее распространенным. Однако этот метод имеет недостатки. Между оправкой и штифтом образуется зазор около 10 мкм, что может привести к склепыванию или свариванию, которое происходит при соударении высокоскоростных частиц и поверхности штифта. В случае большого зазора частицы могут проникать непосредственно в него. При испытаниях хрупких покрытий наряду с адгезионным отрывом на узких кольцевых участках, прилегающих к периметру штифта, происходит когезионный отрыв. Для устранения штифты выполняют в виде полых усеченных конусов, вставленных один в один и притертых друг к другу. Торцы конусов представляют собой концентрические кольца. Такая конструкция штифтов позволяет получить более однородный отрыв.

Поверхность под плазменно-напыленные покрытия готовили следующим образом: вначале ее обезжировали этиловым спиртом, затем производили обдувку дробью. После дробеструйной обработки штифт проворачивали в приспособлении для устранения погрешности. Порошковый сплав напыляли на верхнюю поверхность образца.[1].

Применявшийся метод штифтовой пробы, основан на непосредственном определении силы, направленной перпендикулярно к напыленной и оплавленной поверхности, отрывающей покрытие от основного материала [2, 3]. Прочность сцепления определялась как отношение усилия отрыва к площади торца штифта. На одну точку испытывалось не менее 10 образцов.

В эксперименте использовалась разрывная машина «RIENLE» с плавно изменяющимся усилием от 0 до 50000 Н. (рис. 1), с заряженной в нее оснасткой, и оснастка (рис. 2)

Для проведения эксперимента была разработана оснастка, представленная на рисунке:

На (рис. б) представлены: (слева - направо) деталь для испытания, сухарики, в верхней части рисунка изображена оправка, состоящая из двух частей.

Испытывались образцы с напыленными плазмой покрытиями без оплавления, с оплавлением лазером и горелкой, а также с клеевыми покрытиями, оплавленными лазером.

В процессе исследования наблюдался адгезионный и адгезионно-когезионный характер разрыва образцов (когда покрытие отрывалось либо полностью, либо часть его оставалась на штифте, причем первый случай характерен для больших скоростей сканирования луча лазера).

Данные покрытия можно рассматривать как многофазную систему, в которой наблюдается адгезионный, когезионный и адгезионно-когезионный типы разрушения. Адгезионный отрыв имеет место в случае максимальной $V = 150 \text{ мм/с}$ $d = 3 \text{ мм}$ $k = 0,8$.

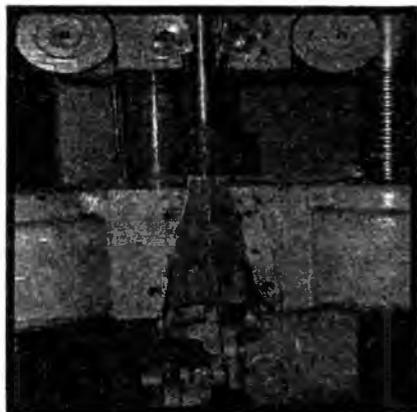


Рисунок 1 - рабочая часть машины «RIENLE»

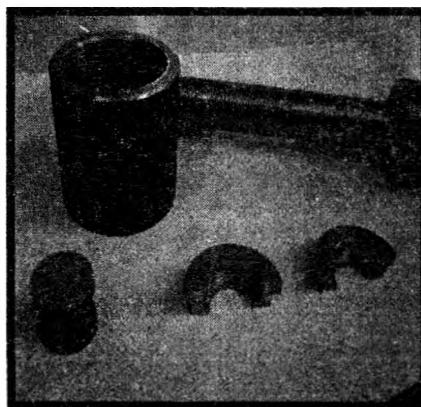


Рисунок 2- слева направо: испытываемый образец, оправка, сухарики

Разрушение покрытия начинается с торцов /5/, где меньше толщина клеевого слоя и имеются дефекты, т. е. нет хорошего контакта клея со склеиваемым материалом. В этих местах концентрируются значительные напряжения. При увеличении нагрузки в них возникают микротрещины, которые постепенно распространяются к центру склеивания. Когда число микротрещин достигает определенного уровня, создаются условия для соединения микротрещин в трещину значительных размеров, что приводит к разрушению.

Клеевые соединения по-разному ведут себя в различных условиях эксплуатации. Они характеризуются хорошими показателями при сжатии сдвиге, удовлетворительными – при равномерном отрыве и плохими – при неравномерном отрыве

Разрушающее напряжение при равномерном отрыве (по ГОСТ 1760 – 69 «Метод определения прочности при отрыве») проводят на цилиндрических образцах диаметром 25 мм, склеенных по торцевым поверхностям.

Площадь всего штифта:

$$A = S = 2 \times \pi \times r^2 = 2 \times 3,14 \times 25 = 157 \text{ мм}^2.$$

Площадь, по которой произошел отрыв:

$$A_1 = 157 : 5 = 31,4 \text{ мм}^2.$$

Разрушающее напряжение при отрыве σ определяется по формуле :

$$\sigma = \frac{P}{A}, \quad \text{где } P \text{ – разрушающая нагрузка, Н, } A \text{ – площадь отрыва, мм}^2.$$

Для нагрузки $P = 2000\text{Н}$:

$$\sigma = \frac{P}{A_1} = \frac{2000}{31,4\text{мм}} = 63,7 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \approx 63,7\text{МПа} = 63,7 \cdot 10^6 \text{Па}, \text{Па} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} 1000 : 31,4 = 31,8$$

Для прутка $\varnothing 6\text{ мм}$ из стали 3: $\sigma_{\text{ст}} = 340\text{ МПа}$.

Измерения проводили по двум шкалам 1000 и 2500 Н. Результаты заносили в таблицу 1:

Таблица 1

№ образца	Вид обработки	Площадь отрыва $A_1, \text{мм}^2$	Сила отрыва, Н	σ отрыва $\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$	
1	2	3	4	5	6
1	№1	- " -	35	140	286
	№2		27	230	370
	№3		16	587	625
2	№1	Плазменное покрытие без оплавления	157	52	32
	№2		157	35	32
	№3		157	43	32
3	№1	Плазменное покрытие, оплавленное лазером $V=50\text{ мм/мин}, d=1\text{ мм}, k=0,8$	30	580	333
	№2		29	560	290
	№3		31	570	310
4	№1	Плазменное покрытие, оплавленное лазером $V=100\text{ мм/мин}, d=1\text{ мм}, k=0,8$	61,1	85	409
	№2		52,3	160	478
	№3		55,5	125	451
5	№1	Плазменное покрытие, оплавленное лазером $V=300\text{ мм/мин}, d=1\text{ мм}, k=0,8$	34	236	294
	№2		36	200	278
	№3		34,7	170	289
6	№1	Плазменное покрытие, оплавленное горелкой	157	1700	160
	№2		157	850	160
	№3		157	2050	160

Одной из наиболее важных эксплуатационных характеристик покрытий является адгезия. Многочисленные исследования работоспособности деталей с покрытиями убедительно показали, что, несмотря на то, что воздействие внешней среды испытывают поверхности покрытий, основной причиной их разрушения является недостаточная связь между материалами покрытия и основы. /5/.

Исследования адгезионной прочности проводились на разрывной машине «RIENLE» с плавно изменяющимся усилием от 0 до 50000 Н на штифтах из стали 40Х, вставленных один в другой и притертых друг к другу. Торцы конусов представляют собой концентрические кольца. Диаметр меньшего конуса 12 мм, большего 20 мм. Такая конструкция штифтов позволяет получить более однородный отрыв.

Применявшийся метод штифтовой пробы основан на непосредственном определении силы, направленной перпендикулярно к напыленной и оплавленной поверхности и отрывающей покрытие от основного материала [6, 7]. Для закрепления образца в разрывной машине использовались специальные оправки, соединяемые с захватами разрывной машины при помощи гибких тросов. Это обеспечивает перпендикулярность усилия отрыва торцевой поверхности образца. Применялась минимальная скорость нагружения, обеспечивающая статический характер нагрузки. Усилие P_0 , соответствующее моменту отрыва покрытия от штифта, отмечалось на шкале, проградуированной в килограммах, а затем переводилось в ГПа. Прочность сцепления и площадь торцевой поверхности штифта определялись по формулам

$$\sigma_c = \frac{P_0}{A}, \quad A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

С целью сопоставления получаемых значений σ_c для разных образцов толщина напыляемых покрытий выдерживалась постоянной и составляла 0.6 мм. Неизменным сохранялся интервал времени между дробеструйной обработкой и нанесением клеевых покрытий, а также напылением. Для обеспечения статистической достоверности использовалось по десять образцов с покрытиями, нанесенными при одинаковых режимах.

Поверхность штифта под клеевые и плазменно-напыленные покрытия готовили следующим образом: вначале ее обезжиривали этиловым спиртом, затем производили обдувку дробью. После дробеструйной обработки штифт проворачивали в приспособлении для устранения погрешности. На поверхность образца наносили порошковый сплав. Далее на плазменно-напыленный слой наносилось поглощающее покрытие (желтая гуашь).

Оплавление осуществляли непрерывным лазером ЛГН-702 мощностью $N = 800$ Вт при диаметре пятна лазерного луча от $d_1 = 1.0 \cdot 10^{-3}$ м до $d_1 = 3.0 \cdot 10^{-3}$ м со скоростями перемещения $V_1 = 50$ мм/мин, $V_2 = 100$ мм/мин, $V_3 = 150$ мм/мин, $V_4 = 200$ мм/мин, $V_5 = 300$ мм/мин и коэффициентами перекрытия $k_{пер} = 0.8$ и $k_{пер} = 1.2$ с целью получения единого фазового состава и заданных свойств по всей толщине покрытия.

Ряд традиционных методик определения прочности сцепления для покрытий оплавленных лазерным излучением непригоден. Так, при штифтовом методе в процессе оплавления происходит затекание расплава в зазор между матрицей и штофтом и их прочное сваривание. Поэтому для изучения влияния режимов оплавления на адгезионные характеристики железных самофлюсующихся покрытий использовали клеевой метод. Для этого напыление производили на торцевые поверхности цилиндрических образцов из стали 45 диаметром 10 мм на толщину 0.6...0.7 мм. Оплавление проводили на лазерной установке непрерывного действия ЛГН-702 при различных режимах обработки. К полученному покрытию приклеивали образец из стали 45 клеем ВТ-25-200 согласно инструкции, разработанной НИИ пластических масс. В случае образования прочного сварного соединения разрыв происходил по клеевой композиции, при неполной адгезии покрытия отрыв происходил по границе раздела с основой. Оценка времени воздействия лазерного излучения на зону контакта с основой (время нахождения жидкой фазы в контакте с подложкой) производилась следующим образом. С обратной стороны запыленного образца просверливалось отверстие диаметром 1,6 мм, не достигающее поверхности на 0,2 мм. В отверстие зачеканивалась хромель-алюмелевая термопара, а запись производилась быстродействующим самописцем. За время контакта принималось значение, в течении которого фиксировалась температура не менее 1253К. Результаты исследований приведены в таблицу 2:

При режимах с небольшим энерговыделением имеет место непроплавление покрытия на всю глубину, что приводит к его скалыванию или растрескиванию вследствие значительной величины остаточных напряжений, возникающих при высоких скоростях охлаждения расплава. При больших энергетических вкладах происходит проплавление не только покрытия, но и основы. При этом происходит значительное перемешивание указанных материалов (первый и второй опыты), что сопровождается снижением уровня физико-механических и эксплуатационных свойств нанесенного покрытия.

Таблица 2

№	Время воздействия лазерного излучения, с	Скорость перемещения лазерного луча, мм/с	Прочность сцепления, МПа																				
			ПР-53	ПР-36																			
1	2,8	0,53	X	X																			
2	2,4	0,67	X	X																			
3	1,2	1,33	398	391																			
4	1,0	1,67	361	351																			
5	0,8	2,08	273	6	0,6	3,33	218	233	7	0,4	4,17	90	80	8	0,2	6,67	20	20	9	0,1	15	20	21
6	0,6	3,33	218	233																			
7	0,4	4,17	90	80																			
8	0,2	6,67	20	20																			
9	0,1	15	20	21																			

Исследование процесса лазерной обработки покрытий показали, что в ряде случаев когда достигнуто полное проплавление покрытия не происходит качественного сцепления его с подложкой (опыт №7). Это можно объяснить тем, что в условиях кратковременного воздействия жидкого расплава с основой не успевают в полной мере произойти процессы диссоциации оксидных плёнок, возникающих при напылении, и образование металлической связи между элементами покрытия и основы. Во всех опытах за исключением восьмого и девятого наблюдалось полное проплавление покрытия. Частичное раскисление поверхности раздела покрытия с подложкой как видно из таблицы наблюдается уже при времени воздействия лазерного луча порядка 0,4 – 0,6 с, хотя в этих случаях прочность сцепления достаточно высока. При уменьшении времени воздействия степень раскисления подложки снижается и прочность сцепления остаётся практически на уровне значений, достигнутых при напылении. Как видно из рис. 3 прочность сцепления при воздействии лазерного излучения в интервале 0,6 – 1,0 с резко возрастает от 20 МПа до 400 МПа, а при увеличении времени воздействия свыше 1,2 с разрыв происходит по клеевой композиции, что свидетельствует о полном “приваривании” покрытия к основе. Исследования проводились при плотности мощности лазерного излучения $1,6 \times 10^8 \text{ Вт/м}^2$. Из опытных данных видно, что железное самофлюсующееся покрытие обладает наибольшей выявленной в ходе эксперимента адгезионной прочностью с основой при его оплавлении с технологической скоростью перемещения луча не более 1,67 ... 2,08 мм/с. Уменьшение скорости оплавления ведёт к заметному проплавлению основы и перемешиванию с материалом покрытия, что снижает его физико-механические и эксплуатационные свойства.

Исследования проводились и при других плотностях мощности лазерного излучения, согласно которых можно рекомендовать следующие режимы лазерной обработки:

- 1) $q=1,1 \times 10^8 \text{ Вт/м}^2$, $V=1,33 \dots 2,08 \text{ мм/с}$;
- 2) $q=1,6 \times 10^8 \text{ Вт/м}^2$, $V=1,67 \dots 2,08 \text{ мм/с}$;
- 3) $q=2,1 \times 10^8 \text{ Вт/м}^2$, $V=2,08 \dots 3,33 \text{ мм/с}$.

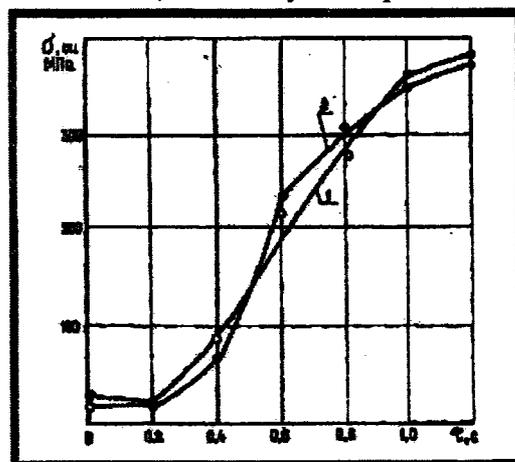


Рисунок 3- Зависимость прочности сцепления покрытия и основы от времени взаимодействия лазерного луча:

- 1 – для сплава ПР-53,
- 2 – для сплава ПР-36

Таким образом, из приведённых расчётов и их экспериментальной проверки следует, что время воздействия высокоэнергетического источника (время контакта жидкой фазы с основой) является важным технологическим параметром в процессе оплавления самофлюсующихся сплавов. С уменьшением времени контакта (менее 0,75...0,6 с) снижается вероятность обменного взаимодействия между атомами покрытия и основы, а значит и уменьшается адгезионная составляющая прочности сцепления. Кроме того, рассчитываемый параметр определяет требования и к методу оплавления. Так как с увеличением времени оплавления увеличивается и количество окислительных реакций, в этой связи процесс термообработки покрытия желательнее вести как можно быстрее. Традиционные методы оплавления в частности ацетиленокислородным пламенем, в силу своих технологических особенностей: предварительный разогрев детали, нахождение покрытия в расплавленном состоянии значительно превышающем расчётное время 0,75 - 0,9 с, трудность контроля процесса оплавления (особенно для железных сплавов), уступают по этому показателю процессу лазерной обработки, при которой, изменяя технологические режимы, можно достичь заранее запланированных характеристик газометрических покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спиридонова И. М. Структура и свойства железобороуглеродистых сплавов / *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1984. - № 2. - С. 58 –61.
2. Теория и практика нанесения защитных покрытий/ П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко и др. – Мн.: Беларуская навука, 1998. - 583 с.
3. Ивашко В.С., Куприянов И.А., Шевцов А.И. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий. – Мн. Навука і тэхніка, 1996. – 375 с.
4. Трезно М.С., Москалев Е.В. Клеи и склеивание. – Л.: Химия, 1980 – 120 с.
5. Куприянов И.Л., Геллер М.А. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления. – Мн.: Навука і тэхніка. 1990. 176 с.
6. Витязь П. А., Ивашко В. С., Ильющенко А. Ф. и др. Теория и практика нанесения защитных покрытий / Минск: Беларуская навука, 1998.
7. Ивашко В. С., Куприянов И. А., Шевцов А. И. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий. Минск: Навука і тэхніка, 1996.

УДК 621.78.011: 621.81

Шматов А. А.

УПРОЧНЯЮЩАЯ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКАЯ ТЕРМООБРАБОТКА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ

*Белорусский национальный технический Университет
Минск, Беларусь*

Из большого разнообразия методов поверхностного и объемного упрочнения режущего стального инструмента предпочтение отдается таким способам, которые не требуют значительных затрат на их внедрение, эффективны и экологически безопасны. Среди таких способов следует выделить метод «упрочняющей термоциклической термообработки» (УЦТО), который является методом объемного упрочнения и основан «на постоянном накоплении от цикла к циклу положительных изменений в структуре металлов» [1-4]. Также как традиционная термообработка, УЦТО имеет преимущества перед поверхностными способами упрочнения: возможность многократной переточки инструмента, высокая производительность и эффективность процесса, применение традиционного термического оборудования, простота, низкая стоимость и автоматизация процесса. Наибольший интерес представляет процесс УЦТО, который формирует структуру термически упрочненной (закаленной и отпущенной)